高加速寿命试验在光纤声光调制器上的应用研究

李哲[1]，蒙莉[1]，许广宁[2]，袁光华[2]
（1. 重庆赛宝工业技术研究院，重庆 400060；2. 工业和信息化部电子第五研究所，广州 510610）

摘要：目的 将光纤声光调制器产品缺陷激发为可被检测到的故障，找出失效模式，为建立失效机理库及提升产品可靠性提供依据。**方法** 采用高加速寿命试验的方法，结合敏感应力分析结果，设计试验方案，并进行试验，快速将产品内部的设计和工艺缺陷激发出来，变成可检测到的故障。对故障产品进行失效分析，找出失效模式。**结果** 本试验激发出 5 类故障，对故障进行隔离，选 5 类故障对应的故障产品进行失效分析。6#被试品未见异常，8#、12#、15#为内部电-声换能器机械开裂导致失效，11#为晶振内部引脚在振动过程中受到应力作用断裂，导致晶振无输出。**结论** 统计出两类失效模式，一类为电-声换能器机械开裂、一类为晶振内部引脚在振动过程中受到应力作用断裂，为产品后期进一步分析失效机理、建立失效机理库并结合失效机理进行相应的可靠性提升及工艺优化提供了依据。

关键词：高加速寿命试验；失效模式；可靠性
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2020.03.013
中图分类号：TJ04；V45 **文献标识码：**A
文章编号：1672-9242(2020)03-0078-06

Highly Accelerated Life Test Applied to Optical Fiber Acousto-optic Modulator

LI Zhe[1], *MENG Li*[1], *XU Guang-ning*[2], *YUAN Guang-hua*[2]
(1. CEPREI, Chongqing 400060, China;
2. The Fifth Electronics Research Institute of MIIT, Guangzhou 510610, China)

ABSTRACT: The paper aims to stimulate the product defect of the fiber-optic and acousto-optic modulator into a fault that can be detected to find the failure mode, to provide a basis for establishing the failure mechanism library and improving the reliability of the product. The method of high accelerated life test was adopted in combination with the analysis results of sensitive stress, to design the testing program, conduct the test, quickly excite the design and industrial defects inside the product, to turn it to a detectable fault, so as to perform failure analysis on the failing product, and finally find the failure mode. The test provoked five faults, then isolated the faults, and selected five failing products for failure analysis: the tested object 6# showed no abnormality, 8#, 12#, 15# were invalid resulted from the mechanical cracking of the internal electro-acoustic transducer. 11#: the internal pin of the crystal oscillator was subjected to stress during the vibration process, resulting in no output of the crystal oscillator. Two types of failure modes are counted, one is the mechanical cracking of electro-acoustic transducers, and the other is the cracking of the internal pins of the crystal oscillator caused by stress during the vibration process. It provides a basis for further analyzing the failure mechanism, establishing the failure mechanism library and performing corresponding reliability improvement and process optimization in combination with the failure mechanism.

KEY WORDS: highly accelerated life test; failure mode; reliability

收稿日期：2019-08-31；**修订日期：**2019-09-25
Received：2019-08-31；**Revised：**2019-09-25
作者简介：李哲（1992—），男，甘肃兰州人，工程师，主要研究方向为可靠性与环境工程。
Biography：LI Zhe (1992—), Male, from Lanzhou Gansu, Engineer, Research focus: reliability and environmental engineering.

光纤声光调制器广泛应用于光通信、光纤水听器、激光测风雷达、光信息处理与光计算机等光信息系统中，通过对光束进行调制、移频等实现光束在时间上控制或空间上切换，是重要的声光器件。光纤声光调制器的使用环境及设计工艺复杂，可靠性要求高，其质量特性直接影响光通信系统的工作性能，但目前针对器件开展准确有效的可靠性设计工艺改进，尚缺乏系统的失效机理研究[1]。在研制阶段，如何通过试验快速高效地找出光纤声光调制器产品的缺陷，并对试验中出现的故障进行失效分析，对改进其可靠性设计工艺具有重要的意义。

高加速寿命试验（HALT）是以故障物理学为依据的一种激发试验。它把故障或失效当作研究的主要对象，采用步进应力的方法，对产品施加远超过现场环境的单一或综合环境应力，快速将产品内部的设计和工艺缺陷激发出来，变成可检测到的故障，对故障进行分析，并采取纠正措施改进设计，最终使产品可靠性水平越来越高[2-3]。虽然 HALT 试验技术已经广泛应用于电工电子产品中，在机电产品上也有应用，但对于光纤声光调制器开展的 HALT 试验研究还鲜有报道。

文中基于对某型光纤声光调制器薄弱环节与敏感应力的分析研究，采用 HALT 试验方法，通过对光纤声光调制器施加强化的敏感环境应力，将光纤声光调制器缺陷激发为可以被检测到的故障，对其进行失效分析，找出失效模式，深入分析失效机理，为建立更加全面准确的失效机理库提供依据，为光纤声光调制器设计、工艺优化提供指导。

1　高加速寿命试验（HALT）

1.1　产品及 3 试验准备信息

光纤声光调制器主要由器件和驱动器两部分组成，器件主要由声光块体、光纤准直器、匹配电路组成，驱动器主要由振荡电路、调制电路、小信号放大电路、功率放大电路等组成。

本次参加高加速寿命试验的光纤声光调制产品共有 15 套，其中 5 套进行摸底试验，其余试验项目被试品各 2 套。光纤声光调制器被试品组成及对外交联关系如图 1 所示。试验使用的设备为 Qualmark 制造的 HALT/HASS 试验箱：温度变化范围为−100~200 ℃，温度变化率≥70 ℃/min，振动上限 75g，频率范围 1 Hz~10 kHz。试验前，将光纤声光调制器及其驱动器按产品规范规定的正常工作方式安装在试验箱内。

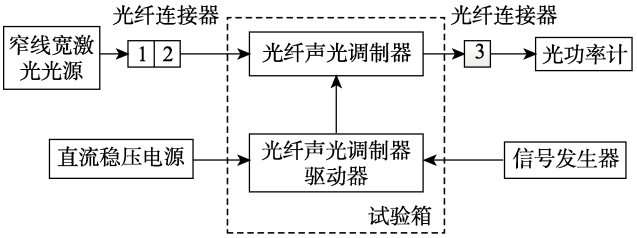

图 1　被试品组成及对外交联关系

Fig.1　Object composition and relationship of foreign

1.2　设计及实施

1.2.1　确定试验项目

研究组根据前期已进行的典型应用环境下光纤声光调制器环境效应矩阵及器件的敏感应力研究确定试验项目类型。经初步分析可知，温度、机械应力、盐雾以及电应力是产品失效的主要影响因素，其中针对盐雾环境，一般会对器件进行三防处理，本试验不予考虑。因此，结合薄弱环节与敏感应力分析，初步确定主要敏感应力为温度、振动以及温度加电等综合应力影响，部分只有综合应力才能激发的失效需要设计综合应力试验。光纤声光调制器 HALT 试验的项目为：低温步进试验、高温步进试验、振动步进试验、快速温度变化试验、综合环境应力试验。

1.2.2　步骤及实施

光纤声光调制器内的光学器件对温度变化较为敏感，因此，正式试验前需开展快速温度变化摸底试验，确定光纤声光调制器敏感温度变化率极限，为正式试验中温度变化率取值提供依据。试验顺序依据应力类型对产品的损伤程度确定，首先进行对产品损伤相对较小的低温步进试验。试验顺序及各步骤间相互关系如图 2 所示。根据摸底试验结果，确定产品温度

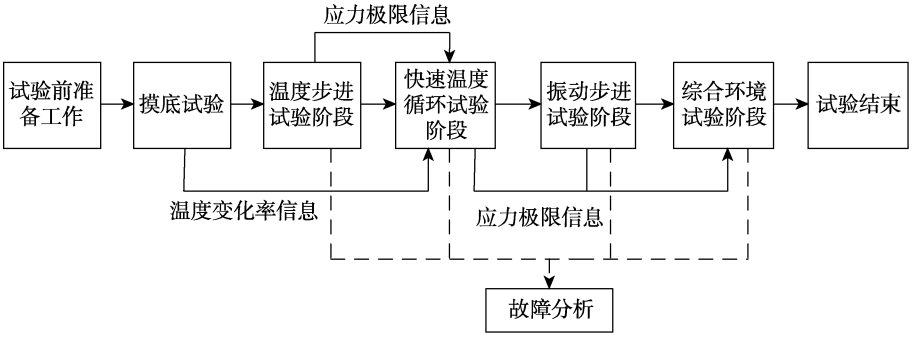

图 2　试验流程

Fig.2　Test process

变化率为 45 ℃/min，根据产品尺寸及质量，确定温度稳定时间为 1 h。由于产品技术规范规定的工作温度范围为−40~70 ℃。

1.2.2.1　温度步进试验

低温步进试验的起始温度为−30 ℃，高温步进试验的起始温度为 60 ℃，均以 5 ℃为步长，电应力施加标称值 24 V。为验证产品在极端温度下的启动能力，温度稳定后通断电 3 次，然后对产品进行测试。当找到产品的破坏极限或达到试验设备的工作极限时终止试验。试验剖面如图 3 所示。

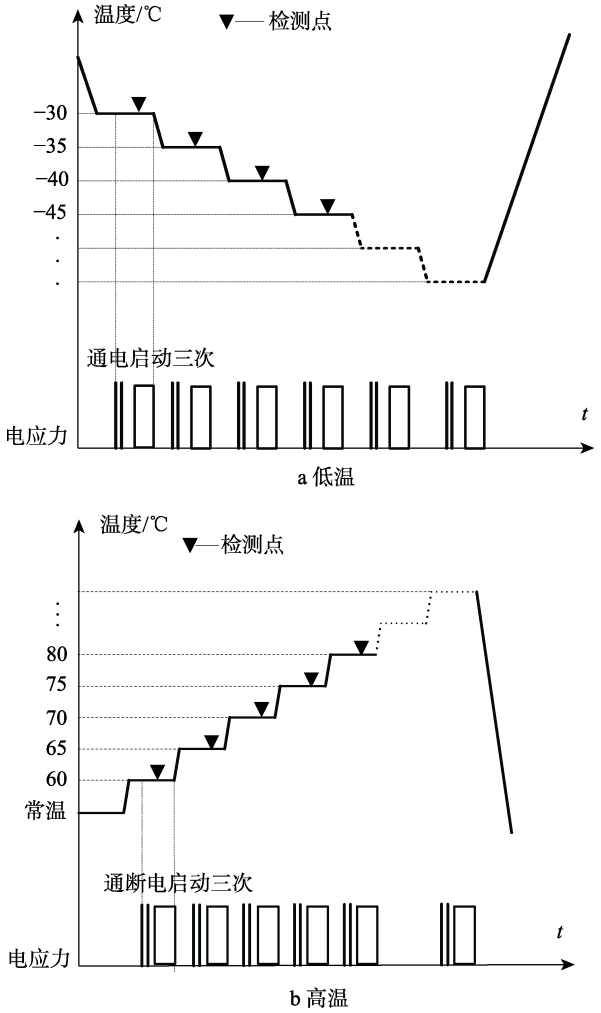

图 3　温度步进试验剖面

Fig.3　Profile of temperature step test: a) low temperature; b) high temperature

1.2.2.2　振动步进试验

振动试验采用三轴六自由度超高斯气锤式振动台，频率为 1~10 000 Hz，起始振动量级为 5g，步长为 5g，每个量级保持 15 min。当振动量级达 20g 时，在每个振动量级台阶结束后，将振动量值降至 5g，以及时发现在高量级振动时出现的焊点断裂等情况。当找到产品的振动破坏极限（AU）或达到试验设备的振动限值时，终止试验，试验剖面如图 4 所示。

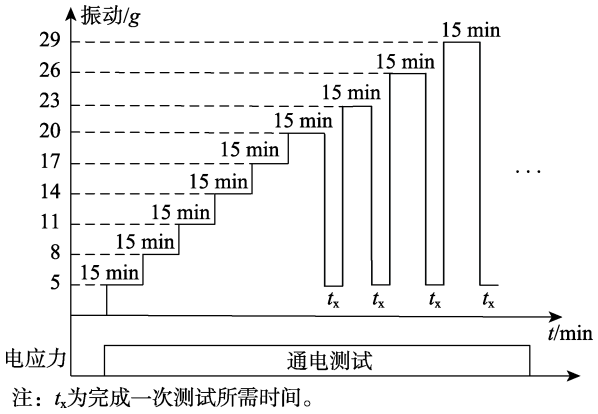

图 4　振动步进试验剖面

Fig.4　Profile of vibration step test

1.2.2.3　快速温度变化试验

快速温度变化试验的温度变化范围为低温工作极限 t_L+5 ℃~高温工作极限 t_U−5 ℃，温度变化速率为 45 ℃/min，电应力按照表 1 的范围每循环施加一种，当产品出现失效后终止试验，试验剖面如图 5 所示。

表 1　电应力变化变化范围

Tab.1　Range of electric stress variation

电源类型	上限值/V	标称值/V	下限值/V
直流	28	24	20

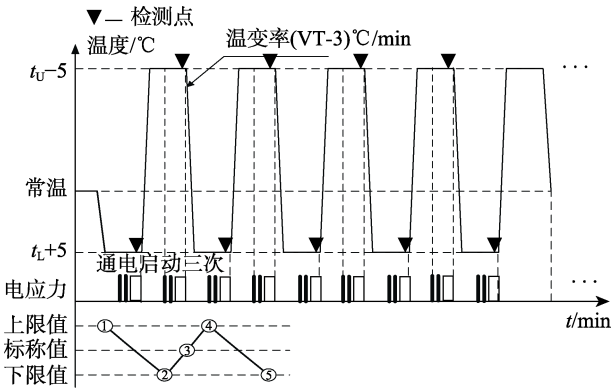

图 5　快速温变循环试验剖面

Fig.5 Profile of rapid temperature cycling test

1.2.2.4　综合环境应力试验

综合环境应力试验的温度及电应力施加方法与快速温度变化试验相同，振动应力施加范围为 1/5a_U~a_U−3g，振动应力步长为 1/5a_U。从第五个循环始终施加最高振动量级，当产品出现失效后，终止试验，试验剖面如图 6 所示。

1.2.2.5　故障判据及处理

按照上述试验流程和步骤依次进行试验，试验过程中根据检测点对试验样品进行测试。通过光功率计

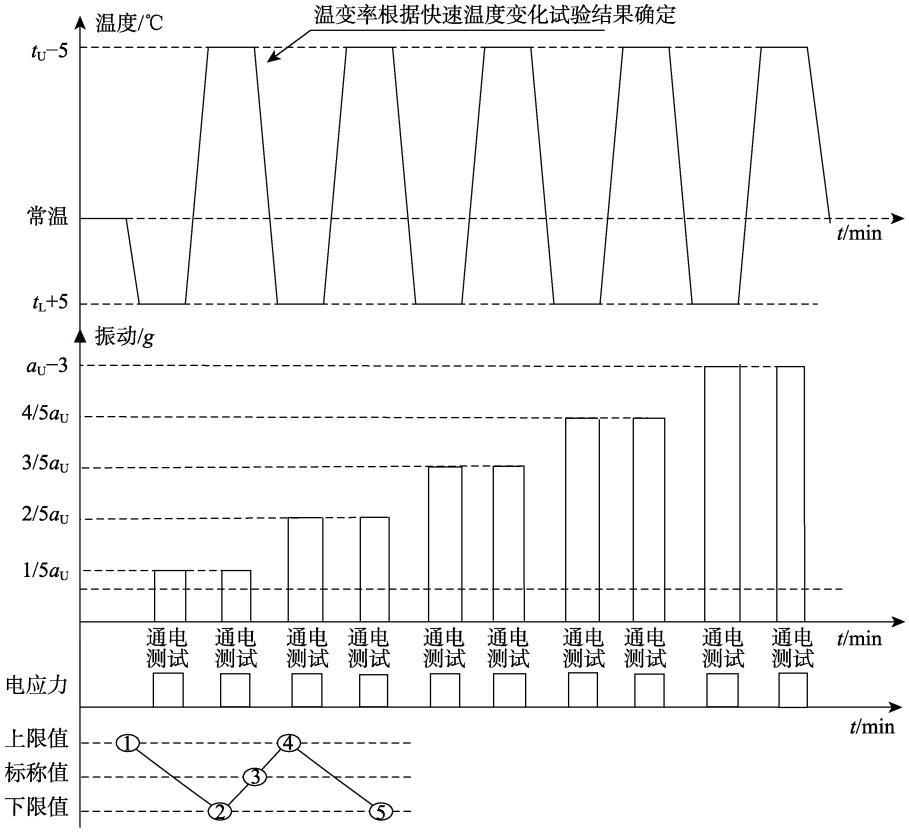

图 6　综合环境试验剖面

Fig.6　Profile of comprehensive environmental test

读数，并计算出消光比和插入损耗。如有一项测试结果超差，则判为故障。在试验应力下出现异常的被试品，若恢复上一量级或恢复正常应力后测试正常，做好记录后继续试验，直到产品出现不可逆的故障。若产品出现不可逆故障，应停止试验，对故障进行隔离，并做失效分析。

2　结果及分析

2.1　HALT 试验

光纤声光调制器高加速寿命试验结束后，对试验结果进行分析。6#、7#被试品进行低温步进试验至−100 ℃时，测试插入损耗和消光比超差，恢复常温后测试正常，由于该项目试验温度已达到试验设备的低温极限，终止试验。8#、9#被试品进行高温步进试验至 135 ℃时，测试插入损耗和消光比超差，恢复常温后测试结果依然超差。12#、13#被试品进行快速温度变化试验至第 34 循环高温阶段，13#被试品测试插入损耗和消光比超差，恢复常温后测试结果依然超差。11#被试品进行振动步进试验进行至 45g 时，测试插入损耗和消光比超差，回到 5g 时插入损耗和消光比超差，无振动条件下插入损耗和消光比超差。14#、15#被试品进行综合环境试验至第三循环低温阶段时，测试插入损耗和消光比超差，继续试验至高温阶段时依然超差。本试验激发出 5 类故障，故障统计情况见表 2。

表 2　故障统计情况

Tab.2　Fault statistics

序号	故障产品	试验阶段	温度应力/℃	振动应力/g	电应力/V	故障现象	现场措施
1	6#、7#	低温步进试验	−100	/	24	插入损耗及消光比测试结果超差	终止试验，进行故障隔离
2	8#、9#	高温步进试验	135	/	24	插入损耗及消光比测试结果超差	终止试验，进行故障隔离
3	13#	快速温度变化试验	120	/	24	插入损耗及消光比测试结果超差	终止试验，进行故障隔离
4	11#	振动步进试验	/	45	24	插入损耗及消光比测试结果超差	终止试验，进行故障隔离
5	14#、15#	综合环境试验	−60	24	24	插入损耗及消光比测试结果超差	终止试验，进行故障隔离

2.2　失效分析

每项试验选取 1 个故障产品进行失效分析，查找失效原因。

1）6#被试品经内部目检及 LCR（电感、电容、电阻）测试，起到声光调制作用的换能器及声光晶体均未发现裂纹形貌，准直器底座上的粘接胶未见发黄、开裂等异常，光纤头未见异常，匹配网络上的电容以及电感的参数也未见存在异常。被试品表现出的低温失效可能与低温点超过了样品正常工作的温度下限有关。

2）8#被试品经内部目检及 SEM 检查发现，被试品内部核心部件——声光调制器存在异常，处于阴、阳电极夹层部位的电-声换能器存在裂纹。电-声换能器为一种压电换能器，其作用是当驱动源的某种特定载波频率驱动换能器时，换能器即产生同一频率的超声波，并传入声光介质，在介质内形成折射率的变化。根据其工作原理，换能器开裂必然会导致工作状态异常而失效。根据放大观察到的裂纹形貌，判断是属于一种机械应力开裂。失效原因与曾经历的温度试验相关。

3）11#被试品电测定位，失效样品板上的晶振各个引脚之间开路，加电后无波形输出。经 X 射线观察发现，晶振内部四根引脚在靠外壳侧根部断裂，断裂处引脚未见明显拉伸、变细的特征。对晶振内部 PCBA 组件进行功能测试，结果显示，内部 PCBA 组件输出正弦波，频率约为 70 MHz，幅值约为 5.00 VDC，输出正常，说明晶振无输出是内部引脚断裂所致。从晶振的结构可知，内部 PCBA 组件通过四根引脚与外壳连接，没有在 PCBA 的其他部位与外壳进行刚性连接，相当于 PCBA 组件在壳体内悬空，引脚根部断裂位置为应力集中的位置。综上所述，晶振内部引脚在振动过程中受到应力作用断裂，导致晶振无输出。

4）检查 12#与 15#被试品内部发现，内部核心部件声光调制器存在异常，电-声换能器表面可观察到多条裂纹。放大观察裂纹形貌，判断是属于机械应力开裂。

失效分析结果详见表 3 及图 7—10。

表 3　失效分析结果

Tab.3　Failure analysis results

序号	被试品编号	故障部位	失效分析结果	初步处理意见
1	6#	调制器	未见异常	/
2	8#	调制器	内部电-声换能器机械开裂	进一步分析失效机理
3	11#	驱动器	晶振内部引脚在振动过程中受到应力作用断裂，导致晶振无输出	进一步分析失效机理
4	12#	调制器	内部电-声换能器机械开裂	进一步分析失效机理
5	15#	调制器	内部电-声换能器机械开裂	进一步分析失效机理

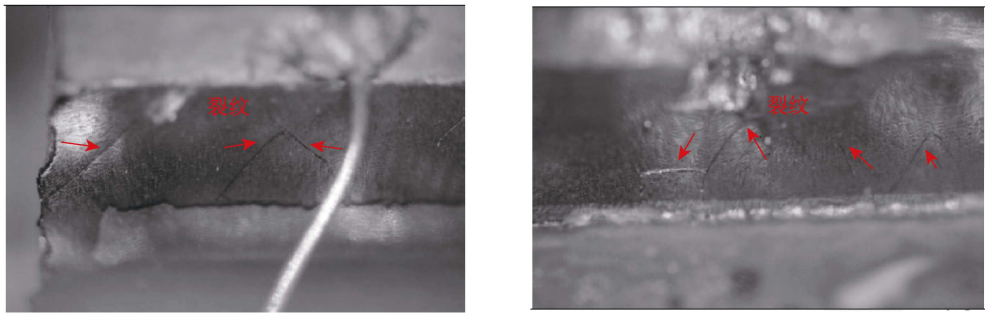

图 7　8#被试品电-声换能器局部放大形貌

Fig.7　Zoom in morphology of 8# object by electro acoustic transducer

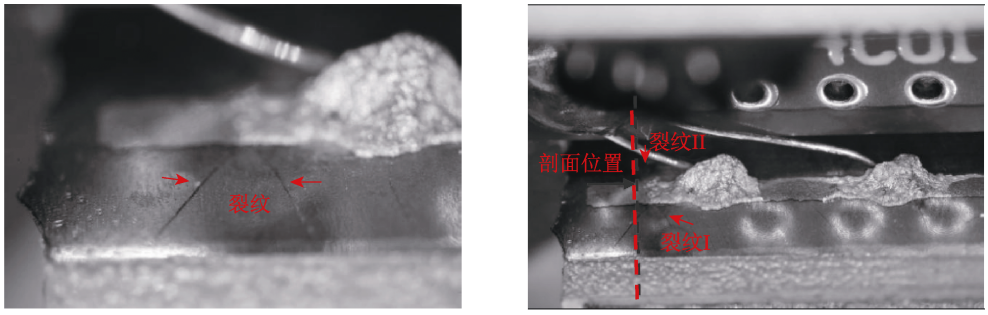

图 8　12#被试品电-声换能器裂纹放大形貌

Fig.8　Crack morphology of 12# object by electro-acoustic transducer

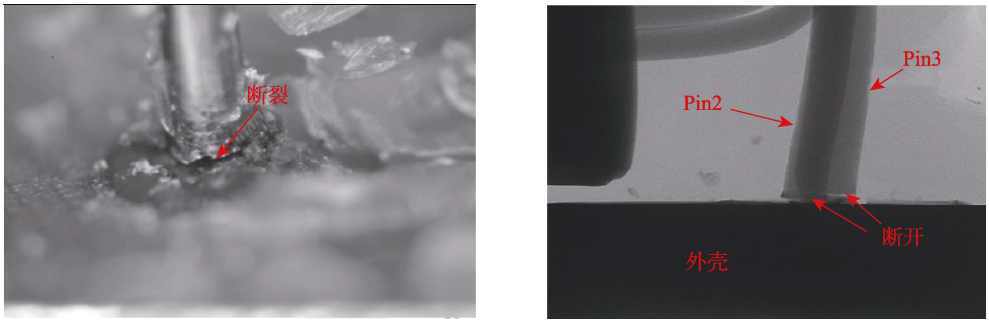

图 9　11#被试品引脚断裂形貌
Fig.9　Pin fracture morphology of 11# object

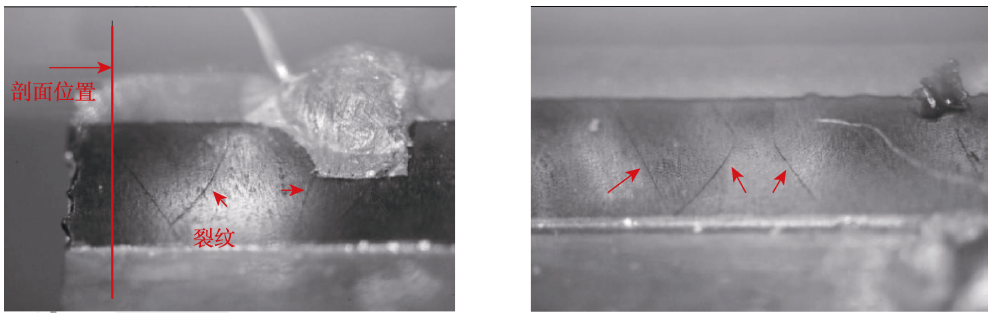

图 10　15#被试品电-声换能器裂纹放大形貌
Fig.10　Crack morphology of 15# object by electro-acoustic transducer

3　结语

文中基于光纤声光调制器产品可靠性提升和工艺优化的目的，以失效机理研究为方向，进行了光纤声光调制器高加速寿命试验的方案设计及实施。首先，根据光纤声光调制器前期环境影响效应分析等结果确定 HALT 的项目，结合产品规范制定具体的试验方案与条件。然后，对光纤声光调制器进行了 HALT 试验设计并实施，试验激发出 5 类故障。最后，对 HALT 试验后的失效产品进行了失效分析，统计出两类失效模式：一类为电-声换能器机械开裂、一类为晶振内部引脚在振动过程中受到应力作用断裂。为产品后期进一步分析失效机理、建立失效机理库并结合失效机理进行相应的可靠性提升及工艺优化提供了依据。

参考文献：

[1]　刘良芳，张俊，吴畏，等. 光纤声光调制器可靠性强化试验方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 10(39): 134-137.
LIU Liang-fang, ZHANG Jun, WU Wei, et al. Reliability Enhancement Testing Method of Fiber Acousto-Optic Modulator[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2018, 39(10): 134-137.

[2]　褚卫华，陈循，陶俊勇，等. 高加速寿命试验(HALT)与高加速应力筛选(HASS)[J]. 强度与环境, 2002, 29(4): 23-37.
CHU Wei-hua, CHEN Xun, TAO Jun-yong, et al. Highly Accelerated Life Test (HALT) And Highly Accelerated Stress Screen (HASS)[J]. Structure & Environment Engineering, 2002, 29(4): 23-37.

[3]　祝耀昌. 高加速寿命试验[J]. 航空标准化与质量, 2005(6): 36-40.
ZHU Yao-chang. Life Test of High Acceleration[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2005(6): 36-40.